

DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.3.22

УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТКАНОГО ПРЕПРЕГА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ И МЕЖСЛОЕВОЙ СДВИГ МЕТОДОМ КОРОТКОЙ БАЛКИ

М.Ю. Лаптев, А.А. Адамов

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Исследованы закономерности деформирования углепластика на основе тканого препрега с различными схемами армирования при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки. Оба вида испытаний основаны на схеме трёхточечного изгиба. Проведён ряд экспериментов для нескольких партий образцов, имеющих разную толщину, при различных отношениях расстояния между опорами к толщине. Для верификации экспериментов выполнен конечно-элементный анализ напряжённо-деформированного состояния образцов. Изучено влияние на эффективные характеристики образца задаваемого модуля упругости монослоя в направлении, перпендикулярном плоскости слоя, и модуля межслоевого сдвига. Затронуты проблемы, связанные с корректным экспериментальным нахождением модулей межслоевого сдвига, обусловленные большой толщиной образцов, сложностью их изготовления, а также особенностями измерения и идентификации деформации при сдвиге. Построены зависимости эффективного модуля упругости при изгибе от фактической толщины монослоя, отношения расстояния между опорами к толщине и от ширины образца. Отмечена необходимость учёта сдвиговых деформаций в схеме трёхточечного изгиба при планировании эксперимента и проведении расчётов. Проверена достоверность определения упругих и прочностных характеристик в зависимости от вида испытаний. Сделаны выводы о значимости тех или иных факторов при моделировании напряжённо-деформированного состояния образцов и при проведении эксперимента.

Ключевые слова: трёхточечный изгиб, сдвиг методом короткой балки, композиционные материалы, модуль межслоевого сдвига

MODELLING OF DEFORMATION BEHAVIOR OF POLYMERIC WOVEN FABRIC PREPREG-BASED COMPOSITE MATERIALS IN FLEXURE AND SHORT BEAM INTERLAMINAR SHEAR TESTING

M.Yu. Laptev and A.A. Adamov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

The mechanisms of deformation behavior of woven fabric prepreg-based carbon-fiber composites with different reinforcement lay-up schemes are studied. The FEM stress-strain analysis is carried out for specimens in flexure and short beam interlaminar shear testing environments. Both methods are based on a three-point bend model. Theoretical grounds underlying the mechanisms governing the deformation of laminates in bending tests are studied. Tests were performed on specimens having different thickness and with different ratios of the distance between supports to the specimen thickness. The effects of the monolayer properties specified in the model, such as the modulus of elasticity in the z-direction and the interlaminar shear modulus, on the effective characteristics of the material are investigated. The problems of correct experimental determination of the interlaminar shear modulus related to the large thickness of specimens, the difficulty of manufacturing and the peculiarities of measurement and identification of the obtained values of deformation in shear are considered. Flexural modulus versus actual monolayer thickness and unsupported lengths versus specimen thickness and width are plotted. The necessity of registration of shear deformation in three-point bend testing for proper design of experiments and execution of calculations is shown. The accuracy and adequacy of the structural and bending characteristics are verified against the testing modes. The results confirm the relevance and validity of any given factor in modeling the stress-strain state of tested specimens.

Key words: three-point bend, short beam shear, composite materials, interlaminar shear modulus

1. Введение

Основные механические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) можно определить, воздействуя на них нагрузками растяжения, сжатия или сдвига. Часто к программе испытаний добавляют испытания на изгиб, хотя на самом деле изгиб является нагрузкой, создаваемой комбинацией этих трёх режимов нагружения [1–4].

В инженерной практике возникает необходимость экспериментального определения предела прочности и модуля межслоевого сдвига. Учёт модуля межслоевого сдвига в расчётных моделях необходим вследствие слабого сопротивления ПКМ сдвигу вне плоскости слоя, где свойства материала определяет в основном матрица, и деградацией механических свойств ПКМ при длительном воздействии внешних климатических факторов. Таким образом, исключение межслоевого модуля сдвига из расчётных моделей (например, при расчёте критической нагрузки потери устойчивости конструкции, эксплуатируемой длительное время в естественных климатических условиях) может привести к ошибочной оценке долговечности или коэффициента запаса конструкции.

Целью работы является численный анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) образцов из ПКМ, возникающего при трёхточечной схеме нагружения в испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг

методом короткой балки с варьированием толщины монослоя и его свойств, ширины образца, направления его армирования и расстояния между точками, на которые он опирается в используемом приспособлении.

2. Условия моделирования НДС образцов

Большинство армированных волокнами композитов искусственного происхождения анизотропно, полный набор их свойств проще всего удаётся определять путём измерений в трёх взаимно перпендикулярных — главных — направлениях. Однако эти направления могут не совпадать с направлениями задаваемой исследователем локальной (и/или глобальной) системы координат, которые обычно обозначают как x , y , z . Главные координатные направления материала традиционно помечаются цифрами 1, 2, 3 (Рис. 1). Далее используются общепринятые для идентифицируемого упругого закона Гука обозначения величин [1–4].

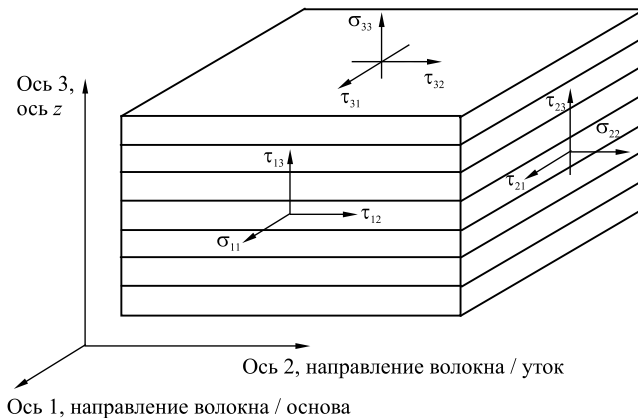


Рис. 1. Система координат материала

На образец ПКМ можно воздействовать шестью видами сдвигового нагружения, но независимыми будут только три напряжения сдвига и, соответственно, три деформации сдвига: τ_{12} , τ_{13} , τ_{23} и γ_{12} , γ_{13} , γ_{23} . Трёх компонентам возникающего напряжения сдвига отвечают три независимых модуля сдвига: G_{12} , G_{13} , G_{23} . Модуль сдвига в плоскости 1–2 слоистого материала называют модулем плоского сдвига (G_{12}), а предельную компоненту напряжения τ_{12}^n —

пределом прочности плоского сдвига. Другие модули упругости (G_{13} , G_{23}) и другие предельные компоненты напряжений (τ_{13}^n , τ_{23}^n) есть межслоевые модули и пределы межслоевой прочности при сдвиге.

Изучение методов испытаний, которые могут быть использованы для определения характеристик межслоевого сдвига, показало, что всем им присущи некоторые недостатки. Основной недостаток связан с проблемой реализации в образце напряжённого состояния чистого сдвига, в частности, в направлении, перпендикулярном плоскости слоёв. Дополнительные проблемы обуславливаются сложностью и стоимостью изготовления образцов, трудоёмкостью проведения испытания и низкой надёжностью получаемых данных. Всё это значительно сокращает число методов, подходящих для эффективного эксперимента с целью последующего проектирования конструкций, обеспечения их прочности и управления качеством.

Наиболее простыми методами испытаний образцов ПКМ, реализующими НДС, которое учитывает характеристики материала вне плоскости слоя, являются испытания на трёхточечный изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки. Обсуждаемые в данной работе эксперименты проводились согласно международным стандартам ASTM D 7264 [5] и ASTM D 2344 [6].

Расчётный прогиб образца при поперечном изгибе и эффективные упругие константы материала находились с помощью пакета конечно-элементного анализа конструкций ANSYS WB 15. При построении конечно-элементной модели использовались 20-узловые объёмные гексаэдрические элементы SOLID186 с квадратичной аппроксимацией перемещений. В местах соприкосновения образца с опорами и нагружающим роликом учитывались условия контакта типа Standard, позволяющие проскальзывание и отрыв, но не допускающие проникновения в материал. С помощью программного модуля ANSYS Composite PrePost посылно задавались свойства материала (модули упругости, модули сдвига, коэффициенты Пуассона в трёх направлениях) с указанием толщины монослоя и направления его укладки.

Для каждого ортотропного монослоя образца считались известными девять значений независимых упругих жёсткостных характеристик, которые обычно обозначают как E_1 , E_2 , E_3 , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} , G_{23} . Упругие модули E_1 , E_2 , G_{12} и коэффициент Пуассона ν_{12} с высокой точностью и относительной простотой определялись из соответствующих экспериментов. Коэффициенты Пуассона ν_{13} , ν_{23} брались близкими к соответствующим значениям для современных высокомодульных материалов.

Ранее в работе [7] было исследовано влияние радиуса опор на точность нахождения модуля межслоевого сдвига армированных пластиков из испытаний коротких балок на изгиб. Однако современные стандарты испытаний на изгиб (в том числе на межслоевой сдвиг методом короткой балки) жёстко регламентируют радиусы опор и нагружающих роликов. В дополнение к этому и в самой работе, и в стандарте испытаний, и в процитированных зарубежных литературных источниках указано, что

испытания на межслоевой сдвиг методом короткой балки не позволяют корректно определять модуль межслоевого сдвига. В то же время для исследуемых в рамках настоящей работы факторов стандарты дают довольно широкий диапазон значений, а в некоторых случаях и вовсе не диктуют никаких ограничений.

Таким образом, в качестве основных неизвестных параметров влияния на НДС образца при нагружении были выбраны: модуль упругости в третьем направлении E_3 , два модуля межслоевого сдвига G_{13} , G_{23} , фактическая толщина монослоя в образце, отношение расстояния между опорами к толщине образца, ширина образца.

При численном моделировании испытаний на поперечный изгиб по соотношению нагрузки и найденного прогиба образца вычислялся эффективный модуль упругости при изгибе для сравнения с данными экспериментов. В случае испытаний на межслоевой сдвиг методом короткой балки сопоставление с экспериментом проводилось по вычисленному прогибу образца при соответствующем уровне нагрузки.

3. Изгиб

Испытания композиционных материалов на изгиб, подобно опытам на растяжение, не вызывают противоречий, по крайней мере, на сегодняшний день. Как и испытания на межслоевой сдвиг методом короткой балки, рассмотренные далее эксперименты на изгиб широко распространены в силу относительной простоты как их осуществления, так и изготовления образцов. Применение данного метода для определения основных свойств композиционных материалов остаётся спорным, так как образец подвергается комбинации неравномерных деформаций, а именно: максимальному растяжению на нижней поверхности, максимальному сжатию на верхней поверхности и максимальному межслоевому сдвигу в средней плоскости. Во всех остальных зонах балка испытывает комбинированные напряжения — и нормальные, и сдвиговые. Таким образом, разрушение может произойти от действия растягивающего, сжимающего, сдвигового напряжения или их сочетания.

Трёх- и четырёхточечное нагружение осуществляется согласно указаниям стандартов. Существует некоторая полемика относительно того, какое нагружение «лучше»: трёх- или четырёхточечное. Чтобы добиться одних и тех же значений изгибающих напряжений в центре балки, в точке нагружения необходимо прилагать одно и то же усилие (либо в двух точках, если нагружение создаётся на расстоянии четверти пролёта). Если точка нагружения отстоит на треть пролёта, то требуемая сила двухточечного нагружения будет на треть меньше сил, прикладываемых в каждом из двух предыдущих случаев. Это даёт преимущество в плане уменьшения локальных повреждений.

При трёхточечном нагружении максимальное напряжение изгиба возникает только в центральном участке балки, и начиная от точек опор, оно линейно увеличивается внутрь балки. При четырёхточечном нагружении изгибающие напряжения остаются постоянными между двумя точками нагружения. Таким образом, в случае приложения нагружающей силы в точке, отстоящей на четверть пролёта, в центральной точке половины пролёта балка будет испытывать постоянный изгиб, а в случае приложения нагрузки на расстоянии одной трети пролёта постоянный изгиб испытывает только одна треть балки.

Если подвести итог, то четырёхточечная конфигурация нагружения, возможно, предпочтительнее трёхточечной в силу уменьшения напряжений балки в местах контакта с испытательным устройством. Тем не менее в настоящее время приблизительно одинаково часто прибегают к обоим видам нагружения.

В авиакосмической отрасли большинство предприятий и отраслевых институтов используют для испытаний на изгиб образцов из ПКМ трёхточечную схему нагружения. Она же применялась и в рамках данной работы (Рис. 2).

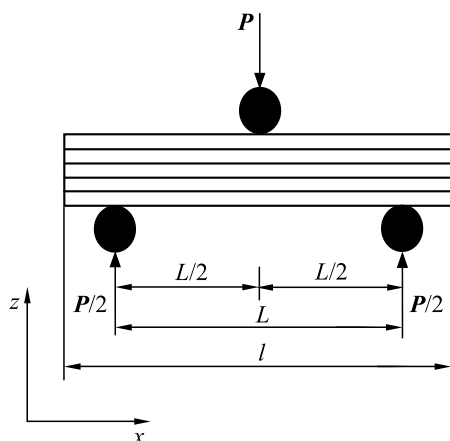


Рис. 2. Схема нагружения образца при изгибе и сдвиге методом короткой балки

Образцы из сплошных слоистых материалов при испытаниях на изгиб нагружают обычно цилиндрами и кладут для опоры также на цилиндры. В результате действительно создаётся концентрация локального напряжения, как и в случае метода испытаний короткой балки на сдвиг. Однако для разрушения образцов из рассматриваемых материалов требуются меньшие усилия, так как отношение длины пролёта к толщине образца намного больше. Поэтому проблема разрушения и прочих повреждений в точках нагружения и опирания не такая серьёзная.

В случае испытаний на изгиб сплошных слоистых материалов либо измеряют прогиб образца под точкой приложения нагрузки, либо приклеивают один или более тензорезисторов на поверхности балки в точках приложения известного изгибающего момента.

Испытания на изгиб проводились с помощью штатного устройства, предназначенного для трёхточечного или четырёхточечного изгиба. Перед использованием устройства осуществлялась проверка параллельности друг другу его верхних и нижних направляющих, затем опорные узлы со сменными опорами — неподвижной и качающимися, устанавливались в заданные положения. Образцы для испытаний на изгиб изготавливались из препрега на основе полимерного связующего и углеродной равнопрочной ткани при различных давлениях формования и имели разные геометрические размеры и схемы укладки слоев препрега.

Ранее обнаружено [1], что, в отличие от достаточно хорошего соответствия между расчётным и экспериментальным значениями модуля упругости при растяжении, при изгибе сравнение даёт менее удовлетворительный результат. Экспериментальный модуль упругости при изгибе зачастую значительно меньше расчётного. Согласно [4], существует два основных фактора, объясняющих различия между экспериментальным и расчётным значениями модуля упругости при изгибе, — это погрешности измерения толщины и возникающие сдвиговые деформации в образце. При определении изгибного модуля упругости тонких листовых материалов с грубой текстурой поверхности точность измерения толщины особенно важна.

При трёхточечном нагружении, кроме прогиба в результате чистого изгиба, также может развиваться прогиб вследствие деформаций сдвига. В работе [1] приведено уравнение для суммарного прогиба при таком виде нагружения:

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \left(1 + \frac{6h^2E}{5L^2G} \right).$$

Первое слагаемое в скобках соответствует деформациям чистого изгиба, а второе — сдвиговым деформациям. Из этого уравнения видно, что вклад сдвиговых деформаций увеличивается пропорционально уменьшению отношения расстояния между опорами к толщине (L/h). То же самое уравнение, записанное через модуль упругости, имеет следующий вид:

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1}{E_\alpha} - \frac{6h^2}{5L^2} \frac{1}{G},$$

где E_T — действительный модуль упругости, E_α — кажущийся модуль упругости (с учётом ошибки вследствие сдвига), G — модуль межслоевого сдвига, h — толщина образца, L — расстояние между опорами. При уменьшении отношения L/h разность между кажущимся (E_α) и действительным (E_T) модулями упругости увеличивается, причем E_α становится ниже E_T .

Результаты испытаний на изгиб различных стеклопластиков в интервале отношений L/h от 7/1 до 70/1 приведены также в работе [3]. По результатам испытаний построена зависимость кажущегося модуля упругости от отношения расстояния между опорами к толщине. На кривой наблюдается уменьшение кажущегося модуля упругости значительно ниже действительного модуля с уменьшением отношения L/h , особенно при $L/h < 16$, которое соответствует минимальному значению, рекомендованному стандартом ASTM [5]. При высоких отношениях L/h кажущийся модуль приближается к действительному. Для материалов с высоким модулем упругости, как и следовало ожидать, ошибка вследствие деформаций сдвига возрастает, так как прогиб, обусловленный чистым изгибом, уменьшается, а прогиб от сдвиговых деформаций, определяемый межслоевым модулем сдвига, практически не изменяется.

Методика расчёта физико-механических характеристик по результатам проведенного испытания при трёхточечном изгибе на основе стандарта ASTM D 7264 [5] предполагает следующие формулы для нахождения:

– модуля упругости

$$E^u = \Delta PL^3 / (4\Delta w b h^3),$$

где ΔP — приращение нагрузки; Δw — приращение прогиба в середине образца, соответствующее изменению нагрузки ΔP ; L — расстояние между опорами; b — ширина образца; h — толщина образца;

– предела прочности:

$$\sigma^u = 3P_{\max} L / (2bh^2),$$

где P_{\max} — максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца;
 – предельной деформации:

$$\varepsilon'' = 6W h/L^3,$$

где W — максимальный прогиб в середине образца при P_{\max} .

Указанные формулы справедливы, если деформации сдвига исключены (за счёт увеличения отношения L/h) или пренебрежимо малы.

Часть результатов данной работы получена при испытаниях образцов с отношением $L/h \approx 18$, поэтому не принимать во внимание влияние сдвиговых деформаций в этих экспериментах было нельзя. Конечно-элементная модель с граничными условиями, используемая для моделирования экспериментального деформирования, представлена на рисунке 3. Проведён тестовый расчёт с начальными свойствами и условиями, а затем параметрический расчёт, где в качестве параметров выступали упомянутые выше характеристики.

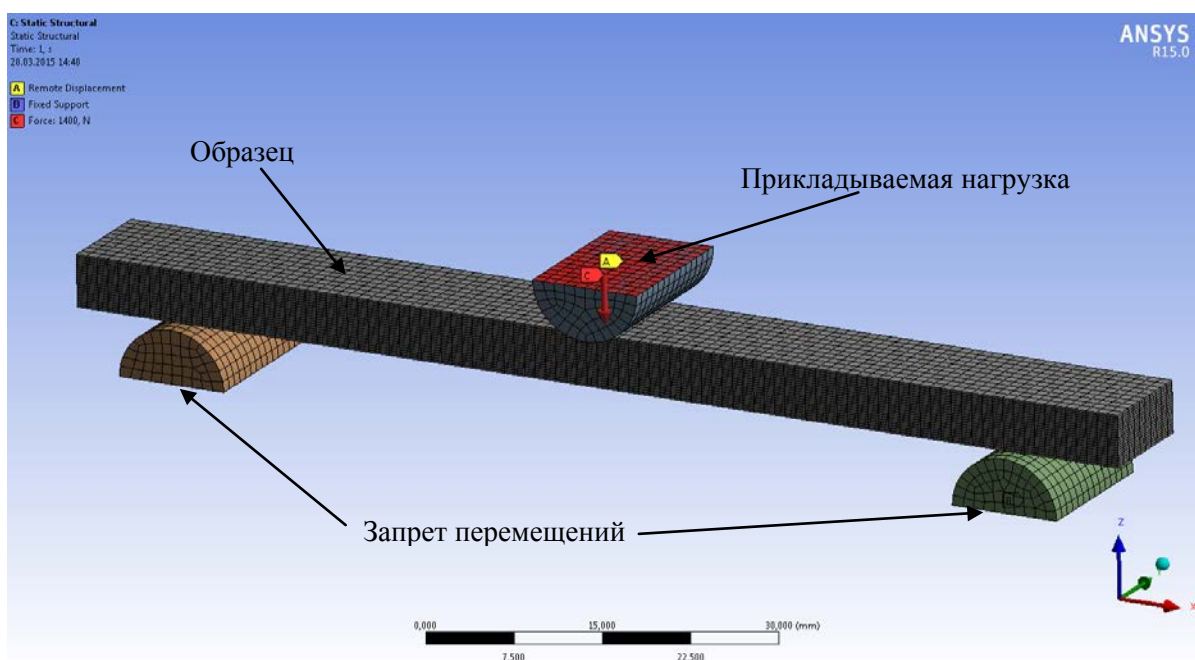


Рис. 3. Конечно-элементная модель образца для испытаний на изгиб

На первом этапе проверялось влияние фактической толщины монослоя на НДС образцов при отношении расстояния между опорами к толщине $L/h = 18$. Необходимость этого продиктована тем, что препреги современных ПКМ имеют собственный допуск на толщину, обусловленный разнотолщинностью ткани и различным содержанием связующего в препреге. Кроме того, добавляется влияние условий формования (давление, температура) и, соответственно, содержания связующего в уже отверждённом пластике. В результате образцы одного материала, но из разных партий препрега и/или сформованные при различных условиях, могут иметь значительно отличающуюся фактическую толщину монослоя. Это, в свою очередь, оказывает существенное влияние на упругие характеристики материала, в частности, на модуль упругости при изгибе даже при учёте эффективной площади образца. В общем случае рост толщины монослоя говорит об увеличении содержания связующего в каждом слое, что не может не сказываться на получаемых свойствах ПКМ.

При численном моделировании влияние толщины монослоя аналогично, так как в расчёте задаются свойства отдельного слоя, которые с ростом толщины монослоя остаются неизменными, однако характеристики стиклоистого пакета снижаются. Результаты вычислений эффективного модуля упругости при изгибе приведены на рисунке 4а для однонаправленных образцов со схемой укладки 21-го монослоя вида $[0]_{21}$, на рисунке 5а — для образцов с так называемой квазиизотропной схемой армирования $[-45/0/45/90]_{21}$. Очевидна хорошая сходимость результатов моделирования с результатами испытаний. Экспериментальные модули упругости при изгибе лежат на расчётной кривой.

Далее найдена зависимость эффективного модуля упругости при изгибе от задаваемых в расчёте упругих постоянных монослоя (Рис. 4б, 5б). Исследования на модели с послойно известными свойствами подтвердили адекватность используемых для ортотропной балки соотношений и влияние модуля межслоевого сдвига на расчётный модуль упругости при изгибе.

Величина модуля упругости E_3 для всех типов образцов на результаты расчёта влияния не оказывает. Для однонаправленных образцов эффективный модуль упругости при изгибе существенно зависит только от величины модуля межслоевого сдвига для монослоя G_{13} , вместе с тем при увеличении отношения расстояния между опорами к толщине образца такое влияние заметно снижается. В отличие от однонаправленных образцов, эффективный модуль упругости при изгибе образцов с квазиизотропной укладкой в равной степени зависит от задаваемых межслоевых модулей сдвига G_{13} , G_{23} .

Выявленные зависимости обостряют и без того серьезную проблему точного и корректного определения модулей межслоевого сдвига. На сегодняшний день существует только одна общепризнанная и наиболее часто применяемая методика испытаний по установлению модуля межслоевого сдвига — это испытания на сдвиг образцов с V-образным вырезом по методу Иосипеску [8, 9]. Указанная методика имеет неоспоримые преимущества перед другими методиками, но есть недостатки, связанные с большой толщиной образцов (для испытаний на межслоевой сдвиг в образце должно быть около 100 слоёв препрега), высокими требованиями к качеству выполнения V-образного выреза и сложностью его изготовления, а также с измерением и идентификацией значений деформации при сдвиге. Тем не менее, серьезных альтернатив методу [8] в настоящий момент нет.

Невозможно не упомянуть о влиянии отношения расстояния между опорами к толщине L/h на НДС образцов при испытаниях на изгиб: оно было многократно подтверждено расчётами и экспериментами. Результаты расчётов в данной работе (Рис. 4в, 5в) также свидетельствуют, что нельзя напрямую, без учёта сдвиговых деформаций, сравнивать результаты испытаний на изгиб при различных отношениях L/h .

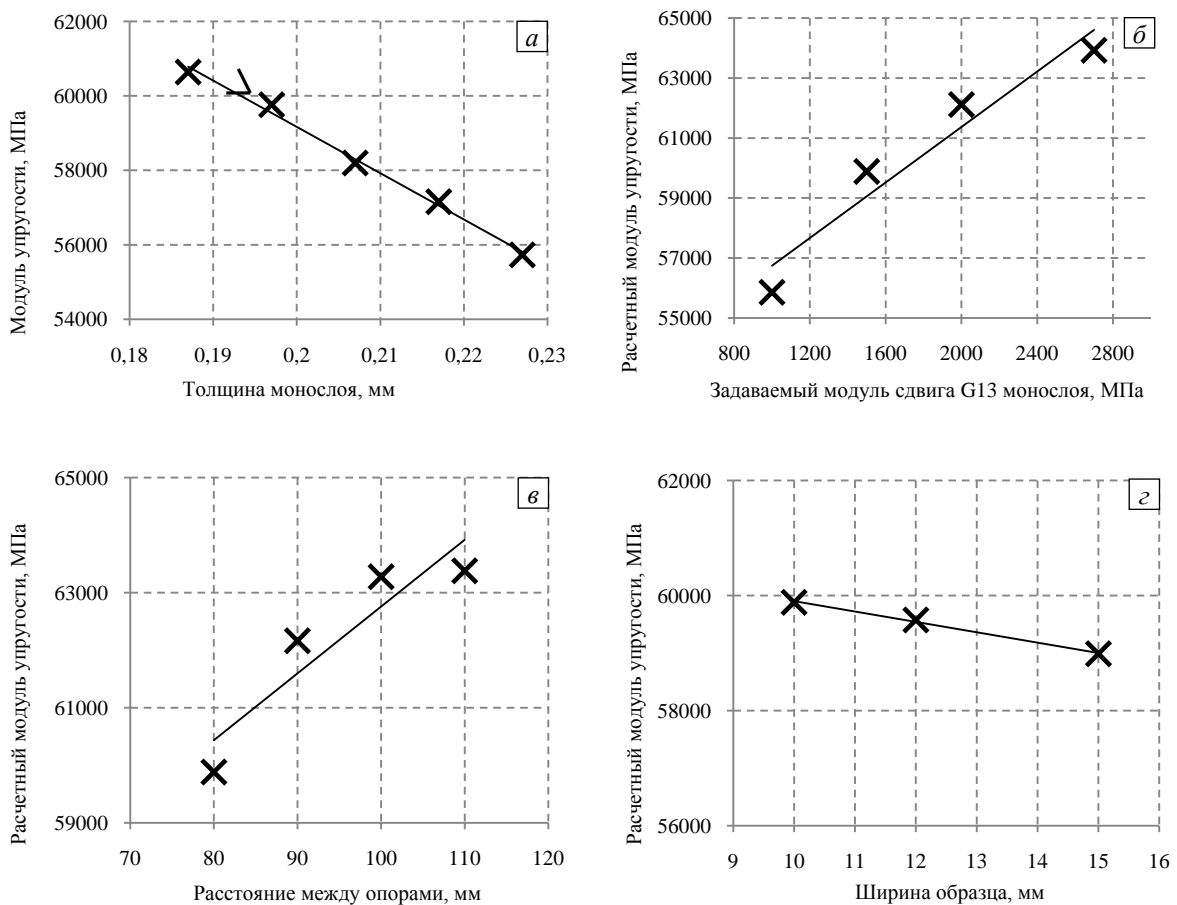


Рис. 4. Зависимость модуля упругости при изгибе образца с укладкой $[0]_{21}$ от толщины монослоя образца (а), задаваемых свойств монослоя (б), расстояния между опорами (в), ширины образца (г); Δ – эксперимент, \times – расчёт

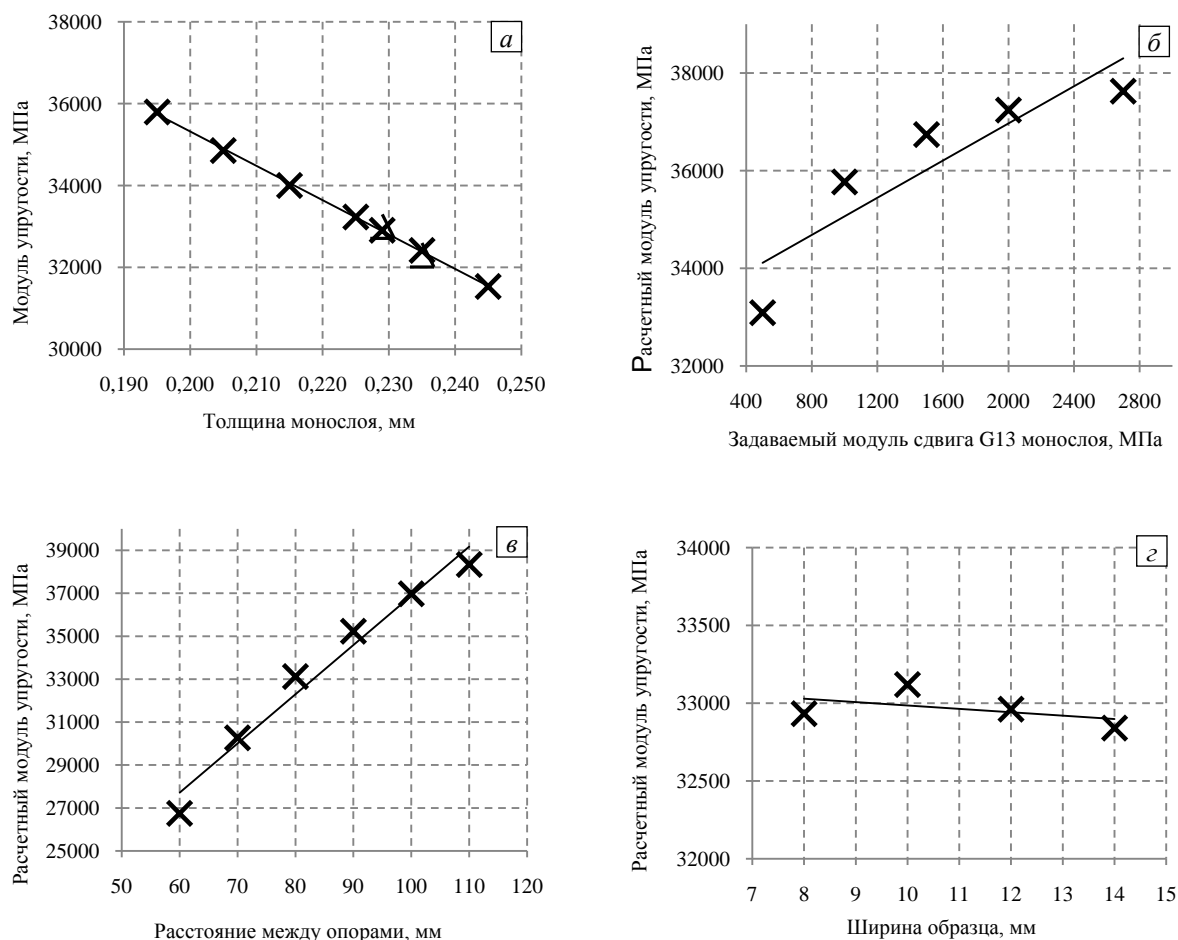


Рис. 5. Зависимость модуля упругости при изгибе образца с укладкой $[-45/0/45/90]_{21}$ от толщины монослоя образца (а), задаваемых свойств монослоя (б), расстояния между опорами (в), ширины образца (г); Δ – эксперимент, \times – расчёт

Таким образом, на практике при планировании экспериментов исследователи, заинтересованные в получении однозначных и воспроизводимых результатов, должны жёстко регламентировать геометрические размеры образца и отношение расстояния между опорами к толщине образца L/h .

4. Межслоевой сдвиг методом короткой балки

У метода испытаний на межслоевой сдвиг методом короткой балки есть много плюсов и минусов. Образец изгибают посредством трёхточечного нагружения. Сдвиговое напряжение, создаваемое при этом в балке, прямо пропорционально величине прилагаемой нагрузки и не зависит от длины пролёта. Напряжения изгиба прямо пропорциональны и прилагаемой нагрузке, и длине пролёта. Таким образом, пролёт между опорами у образца (короткой балки) для испытаний на сдвиг делают небольшим в расчёте на то, что разрушение от межслоевого сдвига произойдёт раньше, чем разрушение от изгиба. Данный метод испытаний регламентирован стандартом ASTM D 2344 [6], который устанавливает, что для высокомодульных композитов отношение расстояния между опорами к толщине образца должно составлять $L/h = 4$.

Следует отметить, что у такой короткой балки модуль упругости при сдвиге или относительную деформацию при сдвиге в целом нельзя измерить правильно. Следовательно, испытание каждого образца позволяет установить только предел прочности при сдвиге.

Главную проблему нахождения такого предела прочности создаёт сложное НДС в короткой балке [3, 4]. Теория простой балки не предоставляет возможности на должном уровне определить напряжение при сдвиге, как это обычно предлагает считать стандарт ASTM. Опора и нагружающие цилиндры создают локальные напряжения в месте контакта в образце-балке. По этой причине заголовок стандарта содержит слова «видимый межслоевой предел прочности при сдвиге...», а сам стандарт постоянно критикует за то, что его указания дают результаты измерения предела прочности при сдвиге, которые в лучшем случае можно использовать только для сравнения характеристик материалов.

Тем не менее интересно, что к этим испытаниям на сдвиг прибегают, возможно, чаще, чем к каким-либо другим, а причина кроется в их простоте. Как сказано выше, испытания на изгиб являются одними из самых простых в осуществлении. Кроме того, для них подходит маленький образец, например, толщиной 6 мм. Следовательно, длина пролёта у низко модульного композита будет равняться 24 мм (то есть в четыре раза больше толщины). С учётом того, что концы образца должны выступать за точки контакта с опорами, общая длина образца составит 40 мм. Ширина образца обычно берётся 6 или 12 мм. Таким образом, из очень малого объёма композиционного материала удастся получить много образцов для испытаний.

Формулы для расчёта максимальных нормальных и касательных напряжений при трёхточечном изгибе просты. Однако при их использовании для оценки прочности материала необходимо принимать во внимание ряд факторов, связанных с характером разрушения образца. Аналитические исследования показывают, что влияние сдвигов на распределение напряжений по высоте стержня значительно меньше, чем на прогиб [9]. Максимальные нормальные и касательные напряжения вычисляются по известным из сопротивления материалов формулам. На практике зачастую сложно зафиксировать границу перехода от разрушения вследствие действия нормальных напряжений к разрушению от касательных напряжений: всегда присутствует некая переходная область. В достаточно широком интервале значений L/h наблюдается смешанный характер разрушения, в результате чего измеренная прочность не является ни истинной межслоевой прочностью при сдвиге, ни истинной прочностью при изгибе.

Методика на основе стандарта ASTM D 2344 [6] предполагает следующую формулу для расчёта предела прочности при межслоевом сдвиге по результатам проведенного испытания:

$$\tau^{xz} = 3P_{\max} / (4bh),$$

где P_{\max} — максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, b — ширина образца, h — толщина образца.

В расчётах применялась та же модель (Рис. 3) с послойным заданием характеристик монослоя. Были изменено количество слоев, уровень нагрузки, расстояние между опорами и другие параметры в соответствии с проведенными экспериментами и требованиями стандарта [6]. По результатам расчётов построены аналогичные зависимости, анализ которых показал схожий характер влияния исследуемых факторов на НДС образца при испытании (Рис. 6).

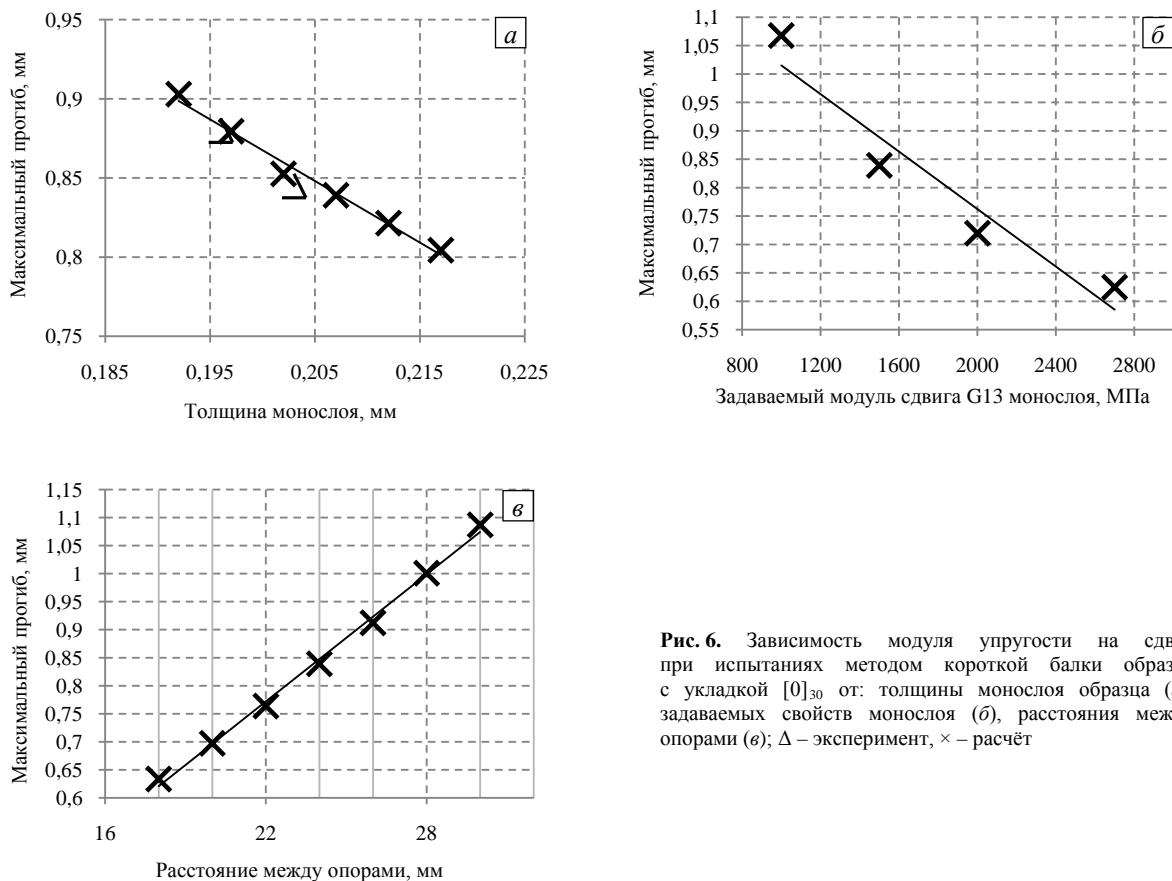


Рис. 6. Зависимость модуля упругости на сдвиг при испытаниях методом короткой балки образца с укладкой $[0]_{30}$ от: толщины монослоя образца (а), задаваемых свойств монослоя (б), расстояния между опорами (в); Δ – эксперимент, \times – расчёт

5. Заключение

Численный анализ неоднородного НДС образцов ПКМ, подвергнутых испытаниям на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки помогает лучше понять и методически учесть причины, приводящие к различию результатов экспериментов, а также чувствительность последних к контролируемым и неконтролируемым факторам технологического и методического характера.

Для численного моделирования механического поведения образцов требуется априорное знание полного набора физико-механических характеристик модели испытуемого материала. Поэтому эффективное совмещение экспериментального и численного исследований предпочтительно выполнять при итерационном уточнении как задаваемых в расчётах свойств монослоя, так и эффективных характеристик ПКМ, вычисляемых по результатам опытов.

Выполненный конечно-элементный анализ образцов, испытанных на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки, выявил существенную зависимость экспериментально устанавливаемых упругих характеристик от задаваемых межслоевых модулей сдвига монослоя, позволил количественно оценить влияние геометрических факторов, особенно отношения L/h . При сравнении результатов испытаний образцов на изгиб и сдвиг следует учитывать фактическую толщину монослоя ПКМ, зависящую от условий формования материала и исходной толщины препрега, имеющей при изготовлении довольно большой допуск.

Простота испытаний в сочетании с низкими материальными затратами обеспечивает рассмотренным методом широкое распространение при проведении сравнительных и приёмо-сдаточных испытаний материалов, а методический учёт выявленных зависимостей позволяет в значительной мере компенсировать недостатки этих методов.

Литература

1. *Ричардсон М.* Промышленные полимерные композиционные материалы / Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
2. *Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
3. *Comprehensive composite materials* / Ed. by A. Kelly, C.H. Zweben. – New York: Elsevier Science, 2000. – 810 p.
4. *Mechanical testing of advanced fibre composites* / Ed. by J.M. Hodgkinson. – Woodhead Publishing, Ltd, 2010. – 378 p.
5. ASTM D 7264/D 7264M – 07. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. – 11 p.
6. ASTM D 2344/D 2344M – 13. Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates. – 8 p.
7. *Щербакова А.О., Сапожников С.Б.* Влияние радиуса закругления опор на точность определения межслойного модуля сдвига армированных пластиков из испытаний коротких балок на изгиб // Известия ЧНЦ УрО РАН. – 2001. – № 2. – С. 101-110.
8. ASTM D 5379/D 5379M – 12. Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. – 13 p.
9. *Adams D.F., Lewis E.Q.* Experimental strain analysis of the Iosipescu shear test specimen // Exp. Mech. – 1995. – Vol. 35, no. 4. – P. 352-360. DOI

References

1. *Richardson M.O.W.* *Polymer engineering composites*. Applied Science Publishers, 1977. 568 p.
2. *Tarnopolskiy Yu.M., Kintsis T.Ya.* *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov* [Methods for static testing of the reinforced plastics]. Moscow: Khimiya, 1981. 272 p.
3. *Kelly A., Zweben C.H.* *Comprehensive Composite Materials*. Elsevier Science, 2000.
4. *Hodgkinson J.M.* *Mechanical testing of advanced fibre composites*. Woodhead Publishing, 2010. 378 p.
5. ASTM D 7264/D 7264M – 07. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials. 11 p.
6. ASTM D 2344/D 2344M – 13. Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates. 8 p.
7. *Scherbakova A.O., Sapozhnikov S.B.* Vliyanie radiusa zakrugleniya opor na tochnost opredeleniya mezhsloynogo modulya sdviga armirovannykh plastikov iz ispytaniy korotkikh balok na izgib [Support rounding radius influence on the reinforced plastic interlayer shear module finding accuracy from the short beam bending test]. *Proceeding of the Chelyabinsk Science Centre UB RAS*, 2001, no. 2, pp. 101-110.
8. ASTM D 5379/D 5379M – 12. *Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method*. – 13 p.
9. *Adams D.F., Lewis E.Q.* Experimental strain analysis of the Iosipescu shear test specimen. *Exp. Mech.*, 1995, vol. 35, no. 4, pp. 352-360. DOI

Поступила в редакцию 06.04.2015; опубликована в электронном виде 30.09.2015

Сведения об авторах

Лаптев Михаил Юрьевич, асп., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: laptev_mu@mail.ru

Адамов Анатолий Арсгалеевич, дфмн, снс, внс, ИМСС УрО РАН; e-mail: adamov@icmm.ru